

ТОШИН Д. С.

Несущая способность, жесткость и трещиностойкость облегченных железобетонных балок

Основным недостатком монолитных железобетонных перекрытий и покрытий остается высокая материалоемкость и значительный собственный вес. Вариантом оптимизации традиционного решения является включение несъемных вкладышей-пустотообразователей в конструкцию и вытеснение части тяжелого бетона. Облегченная конструкция отличается более высокими технико-экономическими показателями, но требуется развитие экспериментальных основ для широкого применения на практике. В работе приводятся результаты экспериментального исследования облегченных железобетонных конструкций, на примере сферических вкладышей показано влияние несъемных пустотообразователей на несущую способность, жесткость и трещиностойкость.

Ключевые слова: изгибаемый железобетонный элемент, облегченная железобетонная конструкция, оптимизация, расход бетона, несъемные пустотообразователи, вкладыши, несущая способность, жесткость, трещиностойкость.

*Toshin D. S.**Load-bearing capacity, stiffness and crack resistance of lightweight reinforced concrete beams*

The main disadvantage of monolithic reinforced concrete floors and roofs remains high material consumption and significant self-weight. An option for optimizing the traditional solution is the inclusion of non-removable inserts-hollow-out in the design and displacement of part of the heavy concrete. The lightweight design has higher technical and economic indicators, but the development of experimental foundations for widespread application in practice is required. The paper presents the results of an experimental study of lightweight reinforced concrete structures, and the influence of non-removable hollow-out inserts on the load-bearing capacity, stiffness and crack resistance is shown on the example of spherical inserts.

Keywords: flexural reinforced concrete element, lightweight reinforced concrete structure, optimization, non-removable void-forming elements, inserts, concrete consumption, load-bearing capacity, stiffness, crack resistance.



**Тошин
Дмитрий
Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ «Тольяттинский государственный университет» (ТГУ), Архитектурно-строительный институт, Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства, Тольятти, Российская Федерация

e-mail: D. Toshin@titsu.ru

Одним из показателей эффективного использования материала в изгибаемых железобетонных конструкциях является расход бетона, обусловленный выбранной формой поперечного сечения элемента. Прямоугольная форма сечения — наиболее простая с точки зрения расчета, конструирования и изготовления; тавровая форма сечения отличается более высокими технико-экономическими показателями. Сборные железобетонные конструкции, как правило, изготавливают относительно сложной формы поперечного сечения. К ним относятся пустотные панели перекрытий [5; 18], ребристые плиты [2; 3], двутавровые балки переменной высоты сечения и др. При всем многообразии вариантов форм таких элементов в качестве расчетного сечения при оценке несущей способности принимается, как правило, именно тавровая форма.

Эпоху строительства, связанную с высокой степенью индустриализации и широким применением сборного железобетона, можно охарактеризовать применением конструкций, отличающихся относительно невысоким рас-

ходом бетона на квадратный метр, перекрытий и покрытий, применением высокопрочной арматуры, оптимальным расходом стали [1]. Монолитное строительство, заместившее существенную долю сборного железобетона в возводимых гражданских зданиях и сооружениях, характеризуется высокой материалоемкостью и менее эффективными технико-экономическими показателями [1]. На изготовление монолитных перекрытий сплошного сечения требуется бетона на 50–70% больше, чем при устройстве перекрытия из панелей пустотного настила. В сравнении с ребристыми плитами разница по этому показателю еще выше. Избыточный расход бетона приводит к увеличению собственного веса железобетонной конструкции, что требует большего армирования и затрат на строительство в целом. Рыночные отношения, конкуренция, экономическая целесообразность требуют от проектировщиков развития, оптимизации и совершенствования конструктивных решений [11; 17], применяемых в монолитном строительстве.

Вариантом повышения эффективности расхода бетона при монолитном исполнении является

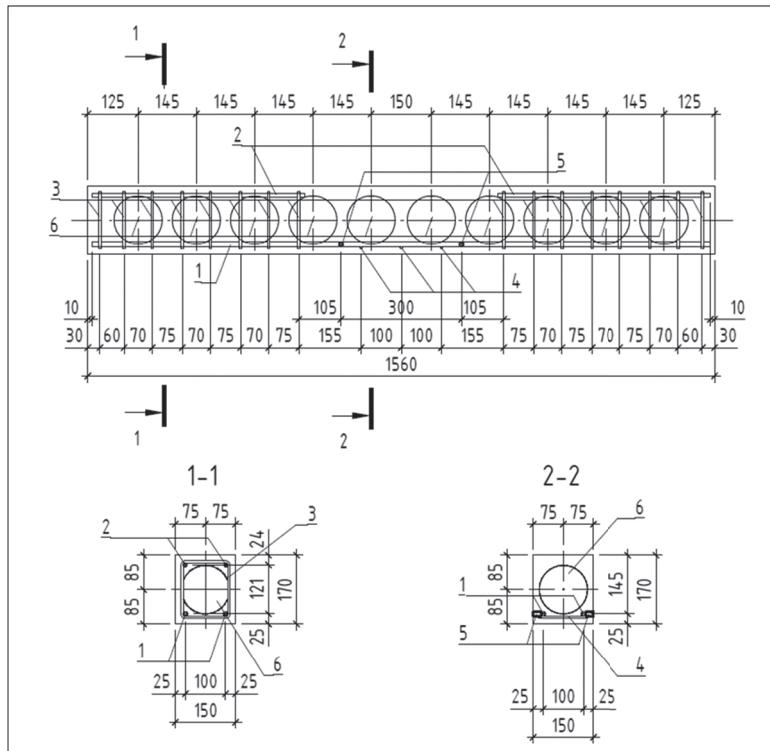


Иллюстрация 1. Проектные размеры и схема армирования опытных балок: 1 — продольная арматура растянутой зоны (рабочая); 2 — продольная арматура сжатой зоны (монтажная); 3 — поперечная арматура в виде замкнутых хомутов на приопорных участках; 4 — концентраторы напряжений в местах запланированного образования нормальных трещин; 5 — втулки, закрепленные сваркой на уровне оси продольной арматуры для фиксации индикаторов часового типа и удлинитель к ним; 6 — пустотообразователи (предусмотрены только в балке БП). Источник: [8]

устройство комбинированных, многослойных и/или облегченных железобетонных конструкций [4; 10; 12–15]. Наиболее широкую область применения могут обеспечить конструкции изгибаемых элементов с несъемными вкладышами сферической или иной формы [6–8; 10; 15], позволяющими укладывать рабочую арматуру в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что весьма актуально для монолитных перекрытий и покрытий с рабочими пролетами по двум осям.

Цель исследования заключается в получении экспериментальных данных о влиянии несъемных пустотообразователей на несущую способность, жесткость, трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов и оценке целесообразности применения монолитных конструкций с пониженным расходом бетона.

Гипотеза исследования заключается в том, что часть бетона, удаленного из зоны сечения с минимальными напряжениями, не снижает или несущественно влияет на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента, в зависимости от совокупности исходных факторов рассматриваемого сечения. При этом может отмечаться уменьшение жесткости и трещиностойкости элемента

в сравнении с аналогом, выполненным без облегчения. Гипотеза обосновывается многолетним опытом изготовления и эксплуатации облегченных конструкций сборных панелей перекрытия, и среди наиболее близких аналогов можно выделить многпустотные плиты с цилиндрическими отверстиями по всей длине изделий. Особенностью применения облегчающих пустотообразователей в монолитных элементах перекрытий и покрытий массового применения является отсутствие в подавляющем большинстве случаев предварительного напряжения арматуры, что на стадии планирования исследования формирует более негативные ожидания по показателям жесткости и трещиностойкости в ненапрягаемых конструкциях в сравнении с аналогами, известными в сборном железобетоне. Планирование и проведение экспериментальных исследований с комплексным анализом прочностных и деформативных параметров позволит получить численные результаты и обеспечит достоверную оценку перспектив применения облегченных изгибаемых конструкций в монолитном строительстве.

Для достижения поставленной цели было запланировано проведение

экспериментального исследования на железобетонных образцах. В качестве опытных элементов приняты железобетонные балки, выполненные в двух вариантах: одна балка сплошного и неизменного сечения по длине (БС), вторая балка пустотная, с применением дискретных сферических пустотообразователей, расположенных с заданным шагом в образце (БП). Опытные балки проектировались одинаковыми по размеру, армированию, применяемым материалам, отличие заключалось лишь в наличии или отсутствии облегчающих элементов, частично заменяющих тяжелый бетон в конструкции.

В данном исследовании в качестве пустотообразователей приняты сферы, изготовленные из пенополистирола. При этом материал шаров не имеет значения с точки зрения работоспособности конечной железобетонной конструкции под нагрузкой и представляет интерес только с технологической и экономической точки зрения, а форма пустотообразователей может быть отдельным направлением исследования в контексте сокращения расхода бетона, обеспечения совместной работы арматуры и бетона в элементе переменной формы сечения, расхода материала на пустотообразователи, трудоемкости их монтажа, крепления и обеспечения проектного положения.

Экспериментальные балки изготавливались с применением тяжелого бетона и армированием в виде пространственных каркасов с продольной арматурой 2Ø10 мм и защитным слоем 20 мм. Проектная длина балок была назначена 1560 мм с целью достижения расчетного пролета при испытании 1500 мм. Размеры поперечного сечения составили 150 × 170 (h) мм. В облегченной балке БП было установлено 10 сферических пустотообразователей, которые равномерно распределялись по длине образца (Иллюстрация 1). Выбранная форма несъемных облегчающих вкладышей и схема их расположения по длине элемента привела к сокращению объема бетона на 23% в сравнении с классической конструкцией балки.

Проектом предусматривалась установка облегчающих элементов посередине высоты и ширины сечения, однако после изготовления было отмечено небольшое смещение пустотообразователей в сторону верхней грани, сжатой при испытании.

Арматура и бетон, применяемые для изготовления образцов балок БС и БП, использовались из одних партий. Все образцы-балки, кубы, призмы были изготовлены из завод-

ской бетонной смеси с одного замеса и испытывались в одном возрасте.

Программа экспериментальных исследований предполагала нагружение опытных образцов гидравлическим домкратом через динамометр ДОС-5 с пошаговым увеличением нагрузки. Расчетная схема испытания балок предусматривала применение шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опор по краям, а также приложение нагрузки в виде двух равных сосредоточенных сил, расположенных на расстоянии $1/3$ пролета, т. е. 500 мм, от каждой опоры. Такая схема испытания позволяет получить зону чистого изгиба в средней трети пролета и исключить влияние поперечной силы, которая равна нулю на длине образца 500 мм. Учитывая именно такую расчетную схему нагружения, в конструкции балок предусматривалось поперечное армирование исключительно на приопорных участках.

В целях комплексной оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных балок БС, БП и последующего сравнения результатов программой экспериментальных исследований предусматривалась установка следующих измерительных приборов и устройств:

- прогибомеры 6-ПАО (3 шт.) – фиксировали перемещения балок в середине пролета и на опорах для определения прогиба f ;

- индикаторы часового типа в комплекте с удлинителями (2 шт.) – закреплялись на рабочих продольных стержнях через приваренные резьбовые втулки для определения средних относительных деформаций растянутой арматуры ε_s на базе 300 мм;

- тензометр Гугенбергера (2 шт.) – устанавливались со стороны верхней сжатой грани в зоне чистого изгиба на базе 100 мм для оценки средних деформаций бетона сжатой зоны ε_b .

Непосредственно перед проведением испытаний опытных образцов были определены прочностные характеристики бетона, который применялся при изготовлении балок. Испытания стандартных кубов $150 \times 150 \times 150$ мм и призм $600 \times 150 \times 150$ мм позволили получить следующие значения: кубиковая прочность 50,2 МПа, призматическая прочность 42,5 МПа, начальный модуль упругости 34000 МПа. К моменту проведения комплекса испытаний возраст бетона превышал 3 месяца.

Теоретически предполагалось и экспериментально подтверждено, что в предельном состоянии разрушение опытных балок соответствует пластическому характеру и начинается с достижения напряжениями предела текучести в продольной арматуре. За величину несущей способности приняты значения изгибающего момента M_{ult} при относительных деформациях в арматуре растянутой зоны $250 \cdot 10^{-5}$. Оценка несущей способности сравниваемых балок показала, что введение сферических пустообразователей привело к снижению M_{ult} с 12,1 до 10,5 кН·м, т. е. на 13%. По мере набора экспериментальных данных, обеспечивающих статистическую основу обработки результатов исследований, все количественные показатели могут быть уточнены.

К моменту разрушения опытных образцов в балке БС прогиб составил 7,4 мм (при $M_{ult} = 12,1$ кН·м), а в БП – 6,4 мм (при $M_{ult} = 10,5$ кН·м). После образования нормальных трещин при равных значениях изгибающего момента прогиб в облегченных балках примерно на 0,7–0,8 мм больше, чем в соответствующей балке сплошного сечения. Например, при $M = 7,3$ кН·м, что составляет 0,60 M_{ult} балки сплошного сечения и может рассматриваться как нагрузка, приближенная к эксплуатационному значению, прогиб составил 3,9 мм и 4,6 мм для образцов БС и БП соответственно. При пролете балок 1500 мм

разница прогибов, выраженная в относительных величинах по отношению к пролету f/l , составляет лишь около $1/2000$.

В экспериментальном исследовании трещиностойкость оценивалась только по моменту образования трещин M_{cr} , ширина раскрытия трещин при пошаговом нагружении не фиксировалась в связи с недоступностью зоны измерения, особенностью испытательной установки и расположением приборов. Величина M_{cr} для двух балок соответствовала значению изгибающего момента при относительных деформациях в продольной арматуре $15 \cdot 10^{-5}$, именно для этого значения в эксперименте было характерно существенное удлинение при очередном приращении нагрузки. Образование трещин в балке БС отмечено между значениями изгибающих моментов 2,45 и 2,63 кН·м, в балке БП – между 1,4 и 1,58 кН·м. Как и предполагалось, облегчение конструкции балки приводит к снижению жесткостных характеристик сечения и уменьшению момента образования трещин, в экспериментальных исследованиях показатель M_{cr} понизился ориентировочно на 40%.

Для оценки трещиностойкости железобетонных образцов по раскрытию трещин косвенно можно использовать величину средних относительных деформаций арматуры растянутой зоны. На всем диапазоне нагружения при равных значениях изгибающего момента деформации арматуры в балках с пустообразователями превышали соответствующие деформации в эталонных балках сплошного сечения. При увеличении уровня нагружения существенного расхождения в разнице $\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_{s(БП)} - \varepsilon_{s(БС)}$ не выявлено, например, при $M = 7,3$ кН·м (0,60 M_{ult} для образца БС) деформации ε_s для балки БС составили $140 \cdot 10^{-5}$, для балки БП – $180 \cdot 10^{-5}$, а при $M = 9,45$ кН·м (0,78 M_{ult} для образца БС) – $190 \cdot 10^{-5}$ и $227 \cdot 10^{-5}$ соответственно.

При испытании опытных балок отмечена отличительная особенность деформирования облегченного образца, связанная с развитием деформаций по бетону сжатой зоны, измеренных на базе 100 мм тензометрами Гугенбергера, установленными ровно посередине пролета (Иллюстрация 1). До образования трещин деформации бетона в балках БС и БП были сопоставимы. После появления трещин в облегченной балке деформации бетона сжатой зоны в ней возросли и превысили на 20–30% деформации бетона балки сплошного сечения. При дальнейшем увеличении нагрузки и появлении трещин в балке, изготовленной без облегчения, деформации бетона сжатой зоны образца БП уже становятся меньше, чем в БС, по мере увеличения изгибающего момента расхождение $\Delta\varepsilon_b = \varepsilon_{b(БС)} - \varepsilon_{b(БП)}$ возрастает: при $M = 7,3$ кН·м деформации ε_b для балки БС составили $75 \cdot 10^{-5}$, для балки БП – $65 \cdot 10^{-5}$, а при $M = 9,45$ кН·м – $99 \cdot 10^{-5}$ и $84 \cdot 10^{-5}$ соответственно. Меньшие деформации бетона сжатой зоны в облегченной балке в сравнении с деформациями бетона в эталонной балке сплошного сечения предположительно могут быть объяснены особенностями конструктивного решения, влияющего на распределение напряжений по высоте сечения, на более резкое изменение высоты сжатой зоны и напряженно-деформированное состояние в целом при образовании трещин.

В связи с сокращением площади сечения бетона преимущественно в растянутой зоне равновесное состояние формируют в основном усилия в бетоне сжатой зоны и в продольной арматуре растянутой зоны. Проведенные исследования позволяют сформулировать предположение о неравномерности распределения деформаций бетона сжатой зоны по длине, вызванное не только появлением

и развитием трещин, но и существенным влиянием дискретно расположенных пустот, приводящих к значению ψ_b значительно меньше 0,9, как принято считать для изгибаемых железобетонных элементов постоянного сечения. Но исследования в данном направлении пока вызывают непреодолимые противоречия, так как неравномерная структура бетона требует использования большей базы измерения, а поиск максимальных и минимальных значений деформаций может быть выполнен только на малых базах. Изначально оценка коэффициента ψ_b при планировании эксперимента не предполагалась, поэтому тензометры Гугенбергера были установлены с некоторым усреднением измеряемых величин, т.е. в пределах зоны деформирования над ребром между пустотами и частично над сферическими вкладышами. Полученные при испытаниях и обработке результатов данные показывают, что изучение данного вопроса может быть отдельной исследовательской задачей для изгибаемых железобетонных конструкций, облегченных дискретными пустотообразователями и распределенными по длине элемента.

Сравнительный анализ данных по несущей способности, деформативности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов выполнялся исключительно от действия приложенной внешней нагрузки без учета собственного веса образцов. Для балочных элементов данное замечание не является критическим, например, для опытных образцов суммарное значение нагрузки за счет введения пустотообразователей сокращается менее чем на 1% от разрушающего значения. Для плитных конструкций перекрытий и фундаментов монолитных зданий применение облегчения может привести к более существенному уменьшению нагрузки и в абсолютных величинах, и в относительных значениях. При сокращении объема уложенного бетона в монолитной плите на 20–25% собственный вес конструкции перекрытия уменьшается на величину, соизмеримую с временной нагрузкой для жилых зданий. Отмеченные в исследовании снижения несущей способности, жесткости и трещиностойкости для облегченных конструкций относятся к условиям одинакового нагружения. Однако при других равных условиях оценка прочностных и эксплуатационных показателей для облегченных перекрытий должна выполняться при меньших значениях нагрузки, чем в конструкциях традиционного исполнения со сплошным сечением.

Каждый конкретный случай требует индивидуального расчета и оценки экономического эффекта, но для массивных плитных конструкций сокращение расхода бетона при облегчении пустотообразователями может быть достигнуто без увеличения армирования, а совокупное снижение расхода стальной арматуры будет обеспечено за счет уменьшения нагрузки на вертикальные несущие конструкции и фундамента.

Заключение

- 1 Использование при проектировании облегчающих пустотообразователей в железобетонных конструкциях балок и плит приводит к снижению постоянной нагрузки и, как следствие, расчетных усилий. Дополнительным эффектом является уменьшение собственного веса здания и нагрузок на нижележащие строительные конструкции и грунты основания, что снижает материалоемкость строительства в целом.
- 2 Установка сферических пустотообразователей на экспериментальных образцах позволила достичь сокращения объема бетона на 23%. Оптимизация формы облегчающих вкладышей и схемы расстановки применительно к конкретным случаям проектирования может обеспечить и более высокие показатели экономии.
- 3 Облегчение конструкций, выполненных без предварительного напряжения, в отдельных ситуациях может приводить к снижению несущей способности изгибаемых железобетонных элементов. На единичных опытных образцах установлено уменьшение M_{ult} на 13%.
- 4 Отмечено падение жесткости изгибаемых железобетонных элементов при введении в их конструкцию несъемных облегчающих пустотообразователей. В условиях эксперимента при равных значениях изгибающего момента прогиб в исследуемой балке превышал соответствующую деформацию эталонного образца классического исполнения на 1/2000 пролета.
- 5 При введении пустотообразователей в конструкцию изгибаемого железобетонного элемента отмечается уменьшение трещиностойкости конструкции. В частности, в проведенном экспериментальном исследовании получено, что момент образования трещин снижается примерно на 40%.
- 6 Влияние облегчения конструкции на несущую способность, жесткость и трещиностойкость следует рассматривать при одновременном учете уменьшения постоянной нагрузки от собственного веса, а экономический эффект от применения пустотообразователей нужно определять по совокупной материалоемкости покрытия, перекрытий, а также вертикальных несущих конструкций и фундамента.

Список использованной литературы

- [1] Байшев А. Ю., Байшев Ю. П., Голубева Е. А. и др. Инновационные подходы к архитектурно-строительному проектированию железобетонных перекрытий многоэтажных зданий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2017. — № 1 (32). — С. 69–73: [сайт] — URL: https://uniip.ru/wp-content/uploads/2018/12/13_1_2017_st.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [2] Землянский А. А., Жуков А. Н., Булавина Д. А. Опыт натурного испытания железобетонных ребристых плит // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2019. — № 4 (43). — С. 79–82. — DOI: 10.25628/UNIIP.2019.43.4.014.
- [3] Кузнецов В. С., Шапошникова Ю. А. Структура стоимости материалов в ребристых плитах при переменной высоте сечения // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 3 (87). — С. 421–432: [сайт] — URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5_3_Kuznetsov_Shaposhnikova_Stoimost3.pdf_d493c19c4c.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [4] Маилян Д. Р., Меретуков З. А., Беляев А. В., Умаров Р. Г. Особенности деформационного расчета трехслойных железобетонных плитных конструкций // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 10 (70). — С. 302–311: [сайт] — URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_21_10_Mailyan_Meretukov.pdf_9c6c5236b0.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [5] Тамразян А. Г., Долганов А. И., Калеев Д. И. и др. К вероятностной оценке надежности железобетонных многпустотных панелей перекрытия // Изв. высш. учеб. заведений. Технология текстильной промышленности. — 2017. — № 4 (370). — С. 267–271: [сайт] — URL: https://www.researchgate.net/publication/339286276_Review_of_modern_optimization_methods_for_bearing_systems_of_buildings_and_structures (дата обращения: 16.07.2025).

- [6] Тереза Е. А., Егоров П. И. Монолитные плиты перекрытия с пустотообразователями различной формы // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. — 2015. — № 1. — С. 335–338: [сайт] — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25037875> (дата обращения: 16.07.2025).
- [7] Топчий Д. В., Болотова А. С., Васильева Ю. А. Технологический процесс устройства монолитных железобетонных перекрытий с вкладышами-пустотообразователями на примере технологии «СОВИАХ» // Перспективы науки. — 2019. — № 2 (113). — С. 61–67: [сайт] — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37132954> (дата обращения: 16.07.2025).
- [8] Тошин Д. С., Булгаков М. Е., Жданов Д. Г. Несущая способность железобетонных балок, облегченных несъемными сферическими пустотообразователями // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 1 (24). — С. 61–66: [сайт] — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=64032905> (дата обращения: 16.07.2025).
- [9] Тошин Д. С., Долгополов Д. А. Прочность, жесткость и трещиностойкость модели облегченной плитной конструкции со сферическими пустотообразователями // Градостроительство и архитектура. — 2023. — Т. 13. — № 1 (50). — С. 10–16: [сайт] — URL: https://journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/109383/ru_RU (дата обращения: 16.07.2025).
- [10] Belyaev A. V., Nesvetaev G. V., Mailyan D. R. Design features of three-layer slab reinforced concrete structures // Materials Science Forum. — 2018. — Vol. 931. — P. 264–268: [сайт] — URL: https://www.researchgate.net/publication/327852471_Design_Features_of_Three-Layer_Slab_Reinforced_Concrete_Structures (дата обращения: 16.07.2025).
- [11] Bugaevsky S., Sinkovskaya E., Ignatenko A. et al. Creation of reinforced concrete structures of a complex geometric shape // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2020. — Т. 15. — № 2. — P. 242–257: [сайт] — URL: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0120_8090.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [12] Fouad A. S., Ezzeldin M., Assem A. A novel framework for the application of topology in lightweight structures // Architecture and Engineering. — 2024. — Т. 9. — № 3. — P. 3–14: [сайт] — URL: <https://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/1242> (дата обращения: 16.07.2025).
- [13] Guo L., Deng M., Zhang W. et al. Flexural behavior of textile reinforced mortar-autoclaved lightweight aerated concrete composite panels // Frontiers of Structural and Civil Engineering. — 2024. — Т. 18. — № 5. — P. 776–787: [сайт] — URL: <https://academic.hep.com.cn/fsce/CN/Y2024/V18/I5/776> (дата обращения: 16.07.2025).
- [14] Ivashenko Yu. A., Serebrennikova E. N., Malikov D. A. et al. Experimental studies of lightweight reinforced concrete frame for sustainable construction // Bull. of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture. — 2022. — Т. 22. — № 3. — P. 24–34: [сайт] — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49371653> (дата обращения: 16.07.2025).
- [15] Ivashenko Yu. A., Sonin S. A. A numerical study of the performance of a combined floor panel // Bull. of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture. — 2022. — Т. 22. — № 4. — P. 5–14: [сайт] — URL: <https://sciup.org/a-numerical-study-of-the-performance-of-a-combined-floor-panel-147239260> (дата обращения: 16.07.2025).
- [16] Călin S., Asăvoaie C., Florea N. 2010. Issues for achieving an experimental model concerning bubble deck concrete slab with spherical gaps // BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI Publicat de Universitatea Tehnică «Gheorghe Asachi» din Iași Tomul LVI (LX), Fasc. 2, 2010 Secția CONSTRUCȚII. ȚĂRHITECTURĂ. — P. 19–26: [сайт] — URL: https://www.researchgate.net/publication/43763827_Issues_for_Achieving_an_Experimental_Model_Concerning_Bubble_Deck_Concrete_Slab_with_Spherical_Gaps (дата обращения: 16.07.2025).
- [17] Jiin-Po Yeh, Ren-Pei Yang. Optimal design of continuous reinforced concrete beams using neural networks // Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence. — 2015. — August. — DOI: 3.10.14738/tmlai.34.1303.
- [18] Yusupov R., Usmanhodjayeva L., Alimov Kh. et al. The resistance of pre-stressed formwork-free floor slabs to the action of short-term static loads // Universum: технические науки. — 2024. — № 10 (127). — С. 67–73: [сайт] — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18450> (дата обращения: 16.07.2025).

References

- [1] Bajshv A. Yu., Bajshv Yu. P., Golubeva E. A. i dr. Innovacionnye podhody k arhitekturno-stroitel'nomu proektirovaniyu zhelezobetonnyh perekrytij mnogoetazhnyh zdaniy // Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN. — 2017. — № 1 (32). — S. 69–73: [сайт] — URL: https://uniip.ru/wp-content/uploads/2018/12/13_1_2017_st.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [2] Zemlyanskij A. A., Zhukov A. N., Bulavina D. A. Opyt natural'nogo ispytaniya zhelezobetonnyh rebristykh plit // Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN. — 2019. — № 4 (43). — S. 79–82. — DOI: 10.25628/UNIIP.2019.43.4.014.
- [3] Kuznecov V. S., Shaposhnikova Yu. A. Struktura stoimosti materialov v rebristykh plitah pri peremennoj vysote secheniya // Inzhenernyj vestnik Dona. — 2022. — № 3 (87). — S. 421–432: [сайт] — URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5_3_Kuznetsov_Shaposhnikova_Stoimost3.pdf_d493c19c4c.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [4] Mailyan D. R., Meretukov Z. A., Belyaev A. V., Umarov R. G. Osobennosti deformatsionnogo rascheta trekhslonnykh zhelezobetonnykh plitnykh konstrukcij // Inzhenernyj vestnik Dona. — 2020. — № 10 (70). — S. 302–311: [сайт] — URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_21_10_Mailyan_Meretukov.pdf_9c6c5236b0.pdf (дата обращения: 16.07.2025).
- [5] Tamrazyan A. G., Dolganov A. I., Kaleev D. I. i dr. K veroyatnostnoj ocenke nadezhnosti zhelezobetonnykh mnogopustotnykh panelej perekrytiya // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. — 2017. — № 4 (370). — S. 267–271: [сайт] — URL: https://www.researchgate.net/publication/339286276_Review_of_modern_optimization_methods_for_bearing_systems_of_buildings_and_structures (дата обращения: 16.07.2025).
- [6] Tereza E. A., Egorov P. I. Monolitnye plity perekrytiya s pustotoobrazovatelyami razlichnoj formy // Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. — 2015. — № 1. — S. 335–338: [сайт] —

- URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25037875> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [7] Topchij D.V., Bolotova A.S., Vasil'eva Yu.A. Tekhnologicheskij process ustrojstva monolitnyh zhelezobetonnyh perekrytij s vkladyshami-pustotoobrazovatelyami na primere tekhnologii «COBIAX» // Perspektivy nauki. – 2019. – № 2 (113). – S. 61–67: [sajt] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37132954> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [8] Toshin D.S., Bulgakov M.E., Zhdanov D.G. Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnyh balok, oblegchennyh nesemnymi sfericheskimi pustotoobrazovatelyami // Ekspert: teoriya i praktika. – 2024. – № 1 (24). – S. 61–66: [sajt] – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=64032905> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [9] Toshin D.S., Dolgoplov D.A. Prochnost', zhestkost' i treshchinostojkost' modeli oblegchennoj plitnoj konstrukcii so sfericheskimi pustotoobrazovatelyami // Gradostroitel'stvo i arhitektura. – 2023. – T. 13. – № 1 (50). – S. 10–16: [sajt] – URL: https://journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/109383/ru_RU (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [10] Belyaev A.V., Nesvetaev G.V., Mailyan D.R. Design features of three-layer slab reinforced concrete structures // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 931. – S. 264–268: [sajt] – URL: https://www.researchgate.net/publication/327852471_Design_Features_of_Three-Layer_Slab_Reinforced_Concrete_Structures (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [11] Bugaevsky S., Sinkovskaya E., Ignatenko A. et al. Creation of reinforced concrete structures of a complex geometric shape // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – T. 15. – № 2. – P. 242–257: [sajt] – URL: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0120_8090.pdf (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [12] Fouad A.S., Ezzeldin M., Assem A. A novel framework for the application of topology in lightweight structures // Architecture and Engineering. – 2024. – T. 9. – № 3. – P. 3–14: [sajt] – URL: <https://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/1242> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [13] Guo L., Deng M., Zhang W. et al. Flexural behavior of textile reinforced mortar-autoclaved lightweight aerated concrete composite panels // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2024. – T. 18. – № 5. – P. 776–787: [sajt] – URL: <https://academic.hep.com.cn/fsce/CN/Y2024/V18/I5/776> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [14] Ivashenko Yu. A., Serebrennikova E.N., Malikov D. A. et al. Experimental studies of lightweight reinforced concrete frame for sustainable construction // Bull. of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture. – 2022. – T. 22. – № 3. – P. 24–34: [sajt] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49371653> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [15] Ivashenko Yu. A., Sonin S. A. A numerical study of the performance of a combined floor panel // Bull. of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture. – 2022. – T. 22. – № 4. – P. 5–14: [sajt] – URL: <https://sciup.org/a-numerical-study-of-the-performance-of-a-combined-floor-panel-147239260> (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [16] Călin S., Asăvoaie C., Florea N. 2010. Issues for achieving an experimental model concerning bubble deck concrete slab with spherical gaps // BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI Publicat de Universitatea Tehnică «Gheorghe Asachi» din Iași Tomul LVI (LX), Fasc. 2, 2010 Secția CONSTRUCȚII. ARHITECTURĂ. – P. 19–26: [sajt] – URL: https://www.researchgate.net/publication/43763827_Issues_for_Achieving_an_Experimental_Model_Concerning_Bubble_Deck_Concrete_Slab_with_Spherical_Gaps (data obrashcheniya: 16.07.2025).
- [17] Jiin-Po Yeh, Ren-Pei Yang. Optimal design of continuous reinforced concrete beams using neural networks // Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence. – 2015. – August. – DOI: 3.10.14738/tmlai.34.1303.
- [18] Yusupov R., Usmanhodjayeva L., Alimov Kh. et al. The resistance of pre-stressed formwork-free floor slabs to the action of short-term static loads // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 10 (127). – S. 67–73: [sajt] – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18450> (data obrashcheniya: 16.07.2025).

Статья поступила в редакцию 16.07.2025.
Опубликована 30.09.2025.

Тошин Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ «Тольяттинский государственный университет» (ТГУ), Архитектурно-строительный институт, Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства, Тольятти, Российская Федерация
e-mail: D. Toshin@tltu.ru
ORCID ID: 0000-0002-1038-8702

Toshin Dmitry S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, FSBE Togliatti State University (TSU), Institute of Architecture and Construction, Center for Architectural, Structural Solutions and Construction Organization, Togliatti, Russian Federation
e-mail: D. Toshin@tltu.ru
ORCID ID: 0000-0002-1038-8702